

I. Láser de Nd:YAG. Cavidades y modos transversales.

LABORATORIO 5 Departamento de Física - UBA.

Versión revisada febrero 2024

Un láser es un dispositivo optoelectrónico capaz de emitir radiación, generalmente en el rango UV-IR en forma de haz coherente, cuasi colimado y altamente direccional. “Láser” es un acrónimo de las siglas en inglés *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (Amplificación de Luz por Emisión Estimulada de Radiación). Sus tres componentes principales son una cavidad resonante, un medio activo que relaja su excitación en forma radiativa, y un medio para excitar al medio activo, que provee la energía al sistema, llamado bombeo. La cavidad óptica rodea el medio con ganancia y provee realimentación de la radiación, para que el medio relaje a través de emisión *estimulada*, antes que por emisión espontánea (fluorescencia). El medio activo puede emitir radiación por decaimiento de niveles electrónicos, vibracionales, etc. El mecanismo de bombeo puede ser óptico (inyección de luz), eléctrico, o formas más exóticas como reacciones químicas o calor. En esta guía introductoria se repasan algunos aspectos teóricos básicos de cavidades, y aspectos operativos de la práctica del Laboratorio.

1 Introducción

En esta práctica se estudiarán las condiciones de estabilidad en cavidades resonantes y las características principales de un láser de Nd YAG [1]. Un láser está compuesto por tres componentes básicos: un mecanismo de bombeo, un medio amplificador y un medio de realimentación. El mecanismo de bombeo puede ser muy variado (excitación con un haz de electrones, mediante luz coherente -otro láser- o luz incoherente -una lámpara de destello-, mediante una reacción química, etc.). El bombeo es la forma que tiene el sistema de recibir la energía necesaria para sostener la emisión láser. El segundo componente primordial de un láser es el medio activo o medio amplificador. Este puede ser un medio sólido (cristalino o amorfo), un líquido o un plasma. El amplificador o medio activo es el que recibe la energía del bombeo y la “transfiere” al haz láser que genera. El último elemento con que cuentan la mayoría de los láseres que existen es un mecanismo para realimentar la radiación (luz) y lograr emisión estimulada [ref estimulada] en el amplificador permitiendo de esta manera que el láser adquiera sus características distintivas, que son su gran colimación, alta coherencia y gran brillo. En el caso de luz, la realimentación se logra mediante espejos que reinyectan una parte de la señal nuevamente en el amplificador de luz.

Una cavidad resonante consiste en dos o más espejos alineados de manera tal que la luz emitida por el amplificador se refleje sobre sí misma, recorriendo el mismo camino óptico muchas veces. Generalmente uno de los espejos de la cavidad resonante tiene una reflectividad menor que el 100%, de tal manera que parte de la luz que está oscilando salga de la cavidad, produciendo un haz colimado que es lo que llamamos la salida de nuestro láser.

Podemos armar diferentes cavidades resonantes, cambiando la configuración de las mismas al variar la distancia entre espejos y sus radios de curvatura. En base a estas configuraciones, las cavidades resonantes se dividen en dos grandes grupos: cavidades estables y cavidades inestables. Las primeras tienen la particularidad de que la distribución de intensidades dentro de la cavidad no se modifica en los sucesivos pasajes de la luz a través de la cavidad. En las cavidades inestables el haz va divergiendo progresivamente y realiza pocos pasajes por el amplificador.

Las cavidades estables son las más comunes y se usan en todos los láseres que funcionan en forma continua. Las cavidades inestables son particularmente útiles en láseres que funcionan en forma pulsada con medios amplificadores de gran ganancia. Un ejemplo indicativo de cavidades estables e inestables junto con un posible trazado de rayos por la cavidad puede verse en el diagrama de la figura 1

- Enumere características de cavidades estables e inestables

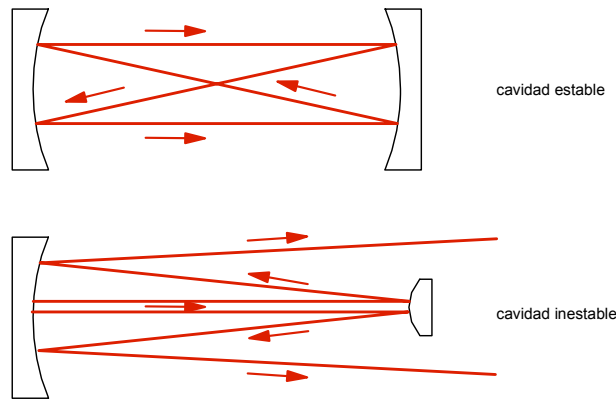


Figura 1: Esquemas típicos del comportamiento de un rayo de luz dentro de una cavidad estable y de una cavidad inestable

2 Cavidades Estables e Inestables

Si armamos una cavidad resonante conformada por dos espejos de radios de curvatura R_1 y R_2 , separados por una distancia d , se puede demostrar que la cavidad será estable sí:

$$0 \leq g_1 g_2 \leq 1 \quad (1)$$

donde hemos definido $g_i = 1 - d/R_i$. En cualquier otro caso la cavidad es inestable. Esta fórmula sencilla nos da un criterio rápido para diseñar cavidades de dos espejos. Para sistemas más complejos, se puede ver el documento adicional de la práctica. En la fórmula anterior se considera que los espejos convergentes tienen radio de curvatura positivo.

- En un gráfico g_1 vs g_2 encuentre las regiones donde las configuraciones son estables y donde son inestables

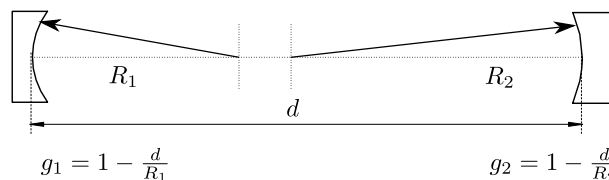


Figura 2: Configuración de cavidad de dos espejos curvos separados una distancia d . Definición de los parámetros g_i

3 Enfoque del diodo láser

En esta práctica se va a utilizar un diodo láser como fuente de bombeo para un láser de Nd:YAG. Es decir, es un bombeo óptico. Recorra al manual de la fuente del láser y siga las instrucciones de encendido para poner en funcionamiento el dispositivo. Asegúrese de que el láser está funcionando dentro de los parámetros normales que indica el manual.

El diodo láser, o láser semiconductor de bombeo tiene un sistema de enfoque compuesto por varias lentes (esféricas y cilíndricas) que permite enfocar la radiación de salida. El sistema de bombeo está diseñado para lograr una zona de enfoque pequeña donde se concentra la energía de bombeo y donde se debe ubicar la barra de Nd:YAG. Este sistema complicado de enfoque está diseñado para compensar la fuerte asimetría espacial de los diodos láser utilizados como fuentes de bombeo, que están compuestos por muchas fuentes muy pequeñas dispuestas en una línea de manera que el haz emitido por estos dispositivos de alta potencia tiene forma alargada. Esto se traduce en valores muy diferentes de divergencia en las dos direcciones de propagación (vertical y horizontal). Para lograr excitación eficiente del láser que estamos bombeando, es necesario concentrar toda esta energía en una zona pequeña lo menos oblonga posible, y por consiguiente se utiliza un sistema óptico astigmático para compensar la asimetría de la fuente.

- Qué tipo de bombeo tiene el diodo láser?
- Por qué no usar directamente un láser semiconductor, en vez de usarlo para excitar al sistema de Nd:YAG?
- Qué longitudes de onda de emisión tiene cada uno de los láseres?

4 Alineación de la cavidad

En una cavidad estable los espejos están alineados de manera que las sucesivas reflexiones de la luz en cada uno de ellos vuelven sobre sí mismas, repitiendo en cada pasaje la misma distribución de intensidades en cada punto de la cavidad. Para lograr esto es necesario alinear los espejos de la cavidad con mucho cuidado. Existen varios métodos que podemos emplear para alinear los espejos en una cavidad láser, tales como la utilización de auto-colimadores o telescopios. El método más cómodo, sin embargo, es utilizar un láser de He-Ne como elemento auxiliar que nos permita alinear los espejos de la cavidad en que estamos trabajando mediante la superposición de las reflexiones del láser en los diferentes elementos ópticos de la cavidad. Cuando los elementos ópticos intercalados están alineados con el eje definido por el haz láser (es decir, sus superficies están ubicadas perpendiculares a la dirección de propagación de la luz), las respectivas reflexiones volverán sobre sí mismas, de lo contrario las reflexiones no se superpondrán con el haz láser de referencia (ver figura 3).

Para alinear todos los elementos ópticos, monte los espejos en posicionadores angulares que le permitan mover los ángulos en la dirección vertical (v) y horizontal (h) en forma independiente. Estos montajes para espejos están provistos con tornillos de paso fino que permiten un control muy exacto de los dos ángulos en forma independiente.

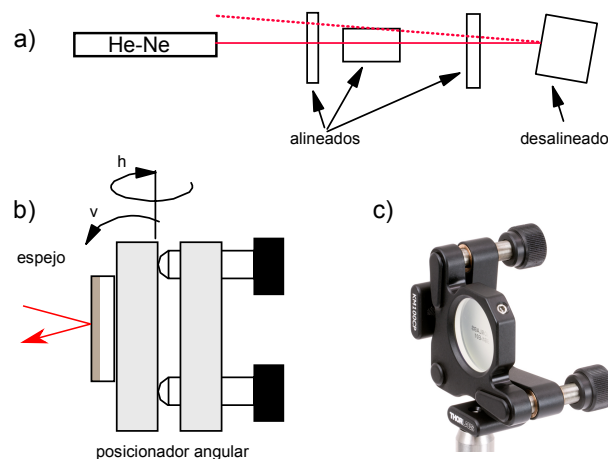


Figura 3: a) Esquema de alineación, mostrando varios elementos alineados (reflexiones sobre el haz incidente) y uno desalineado. Posición angular de precisión; b) esquema y c) posicionador comercial.

IMPORTANTE: Un espejo es (incluso los de uso diario) un vidrio plano al que se lo recubre con un material reflectante, es decir que no absorbe prácticamente nada del espectro electromagnético de interés. Los espejos más comunes tienen un recubrimiento de plata o aluminio. En el espejo del baño de su casa, el recubrimiento se ubica en la parte trasera del vidrio; así se lo protege de impactos y suciedad. El inconveniente de esta configuración es que siempre tendremos la reflexión en la primera cara del vidrio, que es del orden del 4% para luz visible en incidencia normal y un material de índice de refracción $n \approx 1.5$. Esta reflexión no es un problema para un espejo cosmético, pero para aplicaciones de óptica precisa como la que nos encontramos discutiendo, esta primera reflexión es inaceptable. Entonces el recubrimiento se realiza en la primer cara (sobre la que incide la luz). Esto elimina reflexiones espúreas, pero convierte al espejo en un componente frágil. Hay que tener cuidado con su manipulación y cómo se limpia la superficie en la eventualidad de que ésta se manche o se ensucie, o se le deposite polvo.

Los espejos que se usan para alineación auxiliar (los que usaremos para el láser He-Ne) tienen recubrimiento reflectante metálico (por eso se les dice *espejos metálicos*). Los que sirven para armar la cavidad, los espejos para el láser, tienen recubrimientos dieléctricos. Estos tienen mejor reflectividad para el rango de longitudes de onda especificado, son más resistentes al daño óptico, y por ser muy

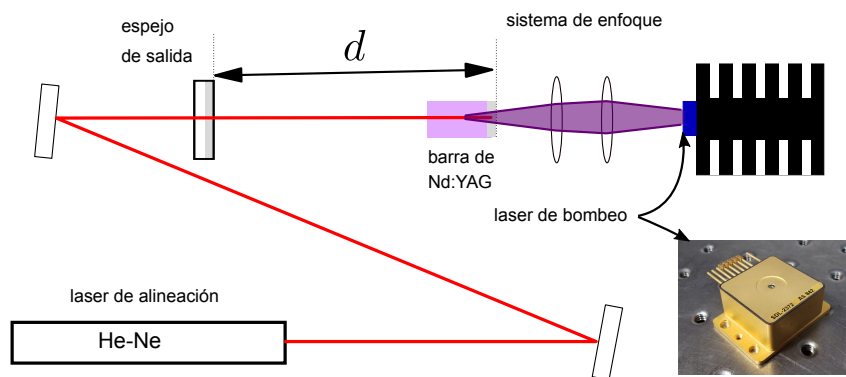


Figura 4: Alineación de espejos de la cavidad: uno de ellos está sobre la barra, el otro es un espejo plano o curvo de salida. Los espejos auxiliares de alineación son espejos metálicos, que direccionan el láser He-Ne o diodo láser rojo en forma contrapropagante al haz láser esperado.

selectivos en longitud de onda, no siempre parecen espejos (sólo reflejan radiación en un rango acotado del espectro). Se los llama *espejos dieléctricos*.

El medio activo del láser (la barra de Nd:YAG, que ya debería estar montada en un posicionador porque es un elemento delicado y de difícil reposición) ya tiene un espejo dieléctrico depositado en su superficie exterior. Es un recubrimiento sofisticado, que transmite con alta eficiencia la radiación del bombeo y refleja un 99.9% de la radiación de la transición del Neodimio.

- Estime la precisión angular con la que puede alinear los espejos.
- Dónde conviene ubicar el láser de alineación?

Arme la cavidad que muestra la figura 4, con el espejo plano de la barra de Nd:YAG y con un espejo plano de 98 o 99% de reflectividad (o un espejo curvo). Según se vio anteriormente la condición de estabilidad de la cavidad depende del radio de curvatura de los espejos y de la distancia entre ellos. Para lograr alinear más fácilmente el láser optamos por una cavidad estable con un espejo de salida de alta reflectividad, lo que nos va a asegurar que el conjunto tenga un umbral de funcionamiento bajo y hará más sencillo el procedimiento de alinear. Observe que el dispositivo que se arma, aparte de los dos espejos que forman la cavidad láser, cuenta con otros dos espejos auxiliares que dirigen el láser de He-Ne. En el proceso de alineación, el eje de la cavidad está definido por el volumen excitado en la barrita de YAG, que proviene del enfoque del diodo láser. El eje de este pequeño cilindro es el eje de la cavidad y el procedimiento de alineación de los espejos consiste en ubicar los espejos de la cavidad con sus superficies perpendiculares a este eje. Para lograr esto es que se incluyen los dos espejos auxiliares, que permiten inicialmente alinear el haz del He-Ne con el eje definido por el volumen excitado. Observe que estos dos espejos dan todos los grados de libertad necesarios para hacer que ambos ejes coincidan. Una vez lograda esta alineación, proceda a alinear los espejos siguiendo el procedimiento explicado anteriormente (o sea alineando las reflexiones del He-Ne en las diferentes superficies).

- Mida cuidadosamente el camino óptico de la cavidad. Tenga en cuenta que el índice de refracción del cristal YAG es $n \approx 1.82$.
- Qué configuración de cavidad se obtiene? Ubíquela en el gráfico g_1 vs g_2 . En qué influye el largo de la cavidad?

Una vez pre-alineado el láser, utilice la tarjeta infrarroja para comprobar que el láser esté funcionando (recuerde que el láser YAG:Nd emite en infrarrojo cercano, con una longitud de onda central de $1.06 \mu\text{m}$). Si no observa nada, es probable que esté cerca pero no del todo, por lo que deberá mover el espejo de salida del láser en una u otra dirección hasta que aparezca la mancha del láser. Si luego de algunos intentos no aparece nada, repita el proceso de alineación con el láser rojo. Una vez obtenida la emisión láser, trate de medir la potencia de salida y optimice la alineación buscando el máximo de la señal en el medidor de potencia moviendo lentamente los espejos. Varíe la potencia de excitación del láser semiconductor variando la corriente y mida simultáneamente la potencia de salida del láser Nd:YAG. Obtenga una curva de eficiencia (potencia de salida en función de la potencia de bombeo). El medidor de potencia calibrado

que está utilizando integra temporalmente la energía recibida. Por lo tanto podemos decir que tiene una resolución temporal baja o lenta. Para estudiar las características de la emisión en una escala de tiempos mas corta necesitaremos de un detector con una resolución temporal mejor. Utilice un fotodiodo PIN que tiene una resolución temporal en el rango de los nanosegundos para hacer un estudio mas detallado de las características de la emisión del láser Nd:YAG. Como es un láser de emisión continua, es probable que no haya una dinámica temporal muy rica en el estado estacionario. Puede probar a interrumpir el haz láser dentro de la cavidad: esto anula el campo de emisión estimulada, y aumenta la inversión de población en el medio activo (acumula energía), debido a que la extracción de energía por emisión estimulada que hace el campo (el haz láser) es muy eficiente. En esa situación, con el material almacenando más energía que en el estado de emisión continua y sin campo, si retira (rápidamente) el obstáculo que bloquea la cavidad, debería poder apreciarse un transitorio de encendido del láser.

TENGA LA PRECAUCIÓN DE ATENUAR FUERTEMENTE EL HAZ DE SALIDA, YA QUE LOS FOTODIODOS RÁPIDOS SON MUY DELICADOS Y PUEDEN DAÑARSE FÁCILMENTE CON UNA SEÑAL DE LUZ EXCESIVA.

Además de tomar esta precaución, asegúrese de que está trabajando con una señal de luz lo suficientemente pequeña como para no saturar el detector. Los fotodiodos rápidos entregan una señal eléctrica proporcional a la luz que reciben con gran resolución temporal, dependiendo del modo en el que están siendo operados (fotovoltaico o fotoconductor, amplificado o simplemente polarizado), para más detalles ver la Ref [2]. Para poder ver esta señal utilice un osciloscopio conectado al fotodiodo.

- Cómo depende la potencia de salida del láser en función de la corriente de excitación en el diodo de bombeo?
- Cómo es la emisión láser en función del tiempo?
- Evalúe las pérdidas que tiene la cavidad que acaba de armar y calcule el valor de la ganancia en el umbral.
- Discuta la eficiencia total del láser

En la cavidad que acaba de armar se han incluido dos espejos, uno de reflectividad máxima (99.99%) que está depositado directamente en la cara posterior de la barra de Nd:YAG y otro que usamos como espejo de salida de $\approx 99\%$. Por lo tanto en cada recorrido la luz dentro de la cavidad experimenta una pérdida de un 1% causada por el espejo de salida y una ganancia o amplificación dada por el medio activo. Cuando el láser está funcionando (cuando supera la condición de umbral), significa que la ganancia del medio activo es suficiente para compensar las pérdidas de la cavidad. Se puede demostrar que la condición de funcionamiento del láser (condición de umbral) corresponde a una ganancia dada por [3]:

$$\gamma_{\text{umbral}} = \alpha - \frac{1}{2l} \ln R_1 R_2, \quad (2)$$

donde l es el largo de la barra de Nd:YAG y R_1 y R_2 las reflectividades de los espejos de la cavidad. El factor α tiene en cuenta otras pérdidas por pasaje, principalmente por absorción y difracción.

5 Modos Transversales

Estudiaremos los modos transversales de oscilación de un láser continuo. Una cavidad resonante se forma cuando a un medio amplificador agregamos espejos a ambos lados para realimentar la radiación. Debido al diámetro finito de la barra de Nd:YAG y de los espejos, no se puede establecer una onda estacionaria de la forma de una onda plana entre los espejos, como sucedería si los espejos tuviesen diámetro infinito. Se puede demostrar que las posibles soluciones estacionarias para la distribución de intensidades dentro de la cavidad resonante sin paredes (abierta, como la de un laser) son en este caso, una familia de funciones que llamamos $TEM_{p,q}$ o “modos transversos electro magnéticos de orden pq ”. Los índices p y q son números enteros que indican el orden de los polinomios de Hermite que forman parte de la expresión analítica de la solución. Una expresión general con la deducción detallada de estas funciones puede encontrarse en las referencias [4, 5].

El modo más “bajo” es el modo $TEM_{0,0}$, que corresponde a una distribución gaussiana de intensidades en función de la coordenada radial transversa, r . Modos superiores tienen distribuciones un poco más

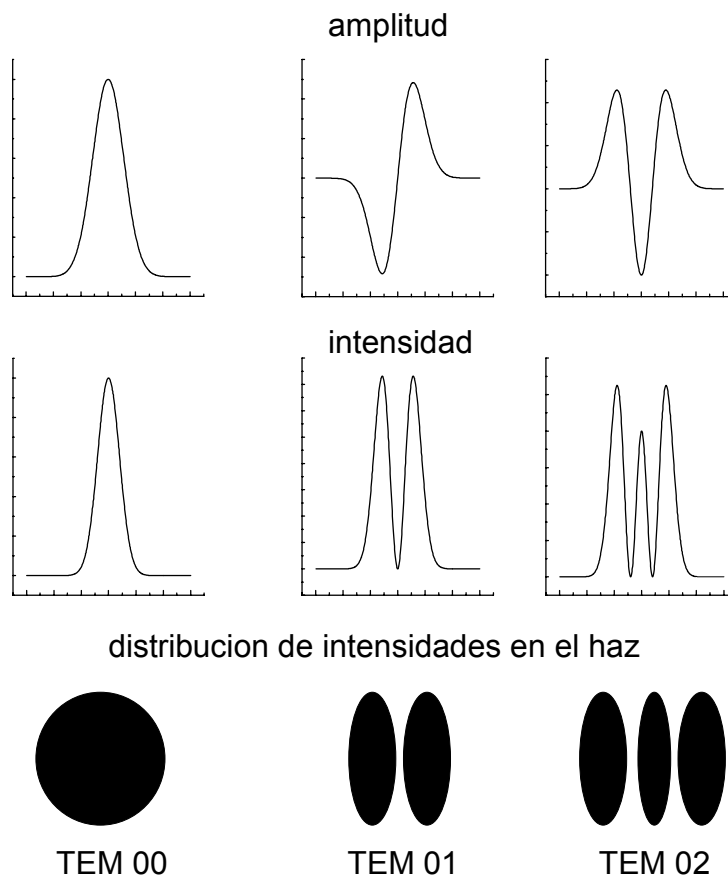


Figura 5: Distribución de amplitud del campo y de la intensidad de algunos modos TEM. Abajo se muestra en forma esquemática el aspecto de la mancha del haz.

complicadas, que incluyen polinomios de Laguerre si el sistema tiene simetría de revolución en el plano transversal, o, más generalmente, combinaciones de los polinomios de Hermite para las dos coordenadas x e y o Estas soluciones se numeran con los subíndices pq que indican cuántos ceros tiene la intensidad en una dada dirección. Como ejemplo en la figura 5 se indican las amplitudes, intensidades y un esquema aproximado de la distribución de intensidades en en el haz para los modos TEM₀₀, TEM₀₁ y TEM₀₂ considerando un sistema cartesiano. Estos modos se obtienen para un medio laser simétrico en la dirección transversal a la dirección de propagación del haz.

- Qué indicarían los índices pq si se refieren a las coordenadas cilíndricas radiales (ρ) y ángulo azimutal (ϕ)? (modos de Laguerre-Gauss)

6 Medición del perfil de intensidad

Arme una cavidad estable y ponga en funcionamiento el laser, optimizando la alineación de los espejos para obtener máxima potencia. Con la tarjeta para detectar infrarrojo, observe la distribución de intensidad en el haz a varias distancias. ¿Qué observa? Se puede medir la distribución transversal de intensidades del haz (perfil) utilizando un detector de potencia y una pequeña abertura más chica que el tamaño del haz. Desplazando la abertura y midiendo la potencia que pasa a través de ella se puede muestrear la intensidad para cada posición de la abertura. De esta forma podemos graficar la distribución de intensidades del haz en un corte transversal del mismo. Si en lugar de medir detrás de una abertura, se mide la potencia que pasa cuando se desplaza un borde (filo) a través del haz, en lugar de medir la potencia para cada punto, se mide una señal que es proporcional a la integral de la distribución de intensidades (ver figura 6).

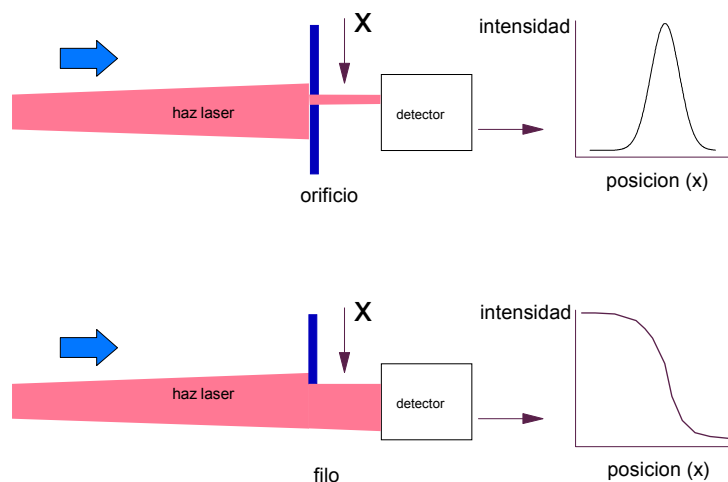


Figura 6: Medición del perfil de un haz: distintos métodos para obtener la distribución de intensidad y la distribución acumulada.

- Diseñe un experimento y mida el perfil de intensidades del haz utilizando alguna de las dos sugerencias anteriores.

Los diferentes modos tienen diferentes distribuciones de intensidades en el plano transversal a la dirección de propagación del haz. Normalmente el laser opera en una superposición de todos los modos que estén por encima del umbral con intensidades relativas que van disminuyendo a medida que aumenta el “orden” del modo. Por eso, el laser funcionará normalmente predominantemente en el modo TEM₀₀ (el de menor umbral) a menos que forcemos la extinción de ese modo en forma externa haciendo que prevalezcan ordenes superiores. Eso se puede conseguir (es difícil!) introduciendo deliberadamente pérdidas en forma selectiva dentro de la cavidad. Mientras está funcionando, introduzca dentro de la cavidad un alambre perpendicular (diámetro $\approx 50 \mu\text{m}$) al eje de la misma, montado sobre alguna plataforma que permita una translación suave y controlada a través del haz.

Otra forma de realizar esto es desalineando ligeramente la cavidad (para hacer esto es preciso hacerlo con una cavidad que sea estable y no una cavidad plano-paralela, que es algo patológica ya que está al límite entre una cavidad estable y una inestable). Una posible cavidad para realizar este experimento es con un espejo de salida de $R = 500 \text{ mm}$ separado unos 350 mm del medio activo. Para entender y conocer si una cavidad es estable o no se recomienda la lectura del material de la práctica “Formalismo de Matrices $ABCD$ etc, etc”

- ¿Dónde conviene colocar el alambre?
- Discuta brevemente qué diámetro aproximado debe tener el alambre y si esta magnitud influye en los resultados que obtiene.
- ¿Importa si el alambre está horizontal o vertical?

Lectura adicional

- B.E.A. Saleh and M.C. Teich. *Fundamentals of Photonics*. John Wiley & Sons, 2019 (recomendado).
- A. Yariv. *Quantum Electronics*. John Wiley & Sons, 1989 (muy bueno, puede resultar muy “cuántico”).
- A.E. Siegman. *Lasers*. University science books, 1986 (muy completo, difícil como primera lectura).

Referencias

- [1] Amnon Yariv. *Quantum electronics*. John Wiley & Sons, 1989, capítulo 10.
- [2] Thorlabs. Photodiode det36a2 manual. <https://www.thorlabs.com/drawings/dc07496715007ee2-6A68E66E-E142-1833-1BEEA50327A872CB/DET36A2-Manual.pdf>, 2017.
- [3] Amnon Yariv. *Quantum electronics*. John Wiley & Sons, 1989, capítulo 9.
- [4] William T Silfvast. *Laser fundamentals*. Cambridge university press, 2004.
- [5] Bahaa EA Saleh and Malvin Carl Teich. *Fundamentals of photonics*. John Wiley & sons, 2019.

Apéndice: Manejo de la fuente del láser de bombeo

El diodo láser de bombeo es un equipo costoso y delicado. Es fundamental conocer el orden de encendido y apagado de su fuente. SI TIENE DUDAS PREGUNTE!! nadie inicia la cursada de Laboratorio 5 sabiendo cómo se usa este equipo.

ORDEN DE ENCENDIDO:

1. Conectar el cable de alimentación de la **fuente principal a la línea (220 V-AC)**, y **la tierra** a la mesa o a **una masa** del laboratorio.
2. Controlar que **las fuentes auxiliares** estén conectadas a la fuente principal, y éstas a su vez también estén conectadas a 220 V. (Una de ellas corresponde al **control de corriente de bombeo** y la otra al **control de temperatura** del diodo; verificar que estén correctamente conectadas).
3. ENCENDER LAS DOS FUENTES AUXILIARES.
4. ENCENDER LA FUENTE PRINCIPAL, con el pulsador de **“encendido general”**.

VERIFICAR QUE EL CONTROL DE CORRIENTE SOBRE EL DIODO ESTÉ EN EL MÍNIMO . (CORRIENTE LASER ≈ 0.00 A)

5. **HABILITAR LA CORRIENTE SOBRE EL DIODO**, con el pulsador de **“encendido diodo”**.

ORDEN DE APAGADO:

1. **DISMINUIR EL VALOR DE CORRIENTE** sobre el diodo láser hasta el mínimo (**CORRIENTE LASER ≈ 0.00 A**).
2. **APAGAR EL DIODO**, con el pulsador **“encendido diodo”**.
3. **APAGAR LA FUENTE PRINCIPAL**, con el pulsador **“encendido general”**.
4. **ESPERAR APROXIMADAMENTE 10 MINUTOS** antes de apagar las fuentes auxiliares, para permitir el enfriado del equipo.
5. **NO DESCONECTAR LAS FUENTES NI LA TIERRA DEL EQUIPO.**